

5.4 금속학적 재질열화 평가

고온에서 사용되는 금속재료는 사용시간이 길어짐에 따라 그 미세조직이 변화하게 된다. 결정립 조대화, 석출물 석출, 구상화, 조직의 분해 등이 발생하게 된다. 일반적으로 많이 사용되는 페라이트와 층상 퍼얼라이트 조직의 강에서의 열화단계를 표 4.과 같이 6 단계로 나눌 수 있다.

5.5 크리프 손상평가

Neubauer는 금속재료의 미세조직과 관련하여 크리프 손상을 표 5과 같이 5 등급으로 분류하였으며, 현재까지 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. Neubauer에 의한 크리프손상의 5단계 분류법은 크리프손상이 기공의 발생 및 합체에 의하여 나타나는 경우에 유용한 방법으로 크리프기공에 의한 손상을 정성적으로

분류하여 그에 따른 수명소진 정도를 비교적 간편하게 평가할 수 있는 방법으로 잔여수명을 평가하는데 사용하기 보다는 재검사 시기를 결정하는데 주로 사용되고 있으며, 비교적 적은 비용으로 손쉽게 평가할 수 있다는 장점이 있다.

잔여수명을 t_R 라고하고 소비수명을 t_S 라고 할 경우에 Neubauer의 크리프손상단계와 수명소비율의 상관관계는 표 6. 와 같다

표 6. 크리프손상과 수명소비율과의 관계

손상단계	수명소비율범위	잔 여 수 명	
		최소수명	최대수명
Class A	0.00-0.12	$t_R=7.33t_S$	미정
Class B	0.04-0.46	$t_R=1.17t_S$	$t_R=24.0t_S$
Class C	0.30-0.50	$t_R=1.00t_S$	$t_R=2.33t_S$
Class D	0.30-0.84	$t_R=0.19t_S$	$t_R=2.33t_S$
Class E	0.72-1.00	파단	$t_R=0.39t_S$

고온고압 배관의 실시간 변위감시 기술



한전전력연구원
발전연구실 발전기계그룹
선임연구원 현 중 섭
Tel : (042)865-5225

1. 서론

국내 발전산업의 급격한 환경변화는 발전소의 운영 조건을 더욱 가혹화하고 있어 잦은 기동정지 및 부하 변동 등 가혹한 운전이 노출되므로써 보일러, 터빈, 배관 등 주요 설비에 많은 영향을 미치고 있다. 특히 고온 고압 배관의 경우, 고정설비로 인식하여 설비 유지관리가 제대로 이루어지지 않고 있어

배관 처짐, 균열 등 다양한 손상이 증가하고 있는 실정이다.

실제적으로 20년 이상 장기간 사용한 발전설비의 정밀 진단 및 수명평가를 수행한 결과로는 다른 설비에 비해 고온배관에서 다양한 문제가 발생하고 있는 것을 확인하였으며 신규 발전소에서도 건설시의 배관계통의 설계 및 설치 오류로 인하여 행거 등 지지계통의 이상 작동으로 배관응력이 집중되어 균열 등의 문제가 계속적으로 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 이러한 문제를 인식하지 못하고 장시간 운전하는 경우 배관의 파열 등 대형사고로 발전할 가능성이 매우 높으며, 실제 외국에서도 노후발전소에서 고온고압의 배관 파열 사고로 인하여 인적, 물적 손해를 입은 경우가 많아 배관의 운전 중 변위를 실시간으로 감시하는 시스템 개발이 매우 필요한 시점에 있다.

따라서, 본 기술은 발전소 주요배관의 운전 중 실시간 감시 시스템을 개발하고자 배관의 3축방향 변위

를 실시간으로 측정하여 운전중 배관거동을 분석할 수 있는 배관변위측정시스템을 개발하였는데 이에 대한 센서 개발 등 관련 기술에 대하여 설명하고 현장에 설치하여 운용한 결과에 대하여 본 논문에서 주로 기술하고자 한다.

2. 배관변위 측정시스템 개발

2-1 배관변위 측정용 센서 개발

배관변위 측정시스템에서 가장 핵심적인 부분은 3차원적인 배관변위를 정확히 측정할 수 있는 센서(sensor) 개발 부분이다. 직선변위측정센서는 저가(低價)용의 LVDT식 센서와 고가(高價)용의 레이저식 센서가 있으며, 회전변위 측정센서로는 회전식 엔코더(Rotary Encoder)를 많이 사용하고 있다.

LVDT식 변위센서는 측정물에 접촉하여 길이, 두께, 직경, 높이 등 직선변위를 측정하는데, Fig. 1처럼 접촉한 면의 변위에 따라 Core가 움직이게 되고 내부 Coil의 자기장 안에서의 Coil의 변위를 일정한 전기신호로 변환시킨다. Core가 중심점에 있을 때 일차측(V_A)과 이차측은 같으며 따라서 $V_A = V_B$ 이고 출력 $V_0 = 0$ 이 된다. Core가 이동하면 이동변위에 비례하여 V_A 가 V_B 와 달라지고, 따라서 영점으로부터 양쪽방향으로의 변위에 비례하여 V_0 의 크기와 위상이 변한다. 즉, 측정시 중심점(V_e)으로부터 양 또는 음으로 Core 변위가 변화할 때 발생하는 V_A 와 V_B 의 여기전압으로 변위를 감지하는 구조이다.

또한, 배관의 변위위치를 각도로 검출하기 위해서는 회전식 엔코더에 의해 측정된다. 회전식 엔코더는 대개의 경우 비접촉식으로 내부에는 보통 유리 disk가 shaft에 고정되어 있고, 엔코더의 몸체에 센서가 위치해 있어, 회전으로 인해 디스크에 새겨진 눈금을 센서가 읽는 형태로 각도를 검출한다.

따라서, 상기에서 언급한 LVDT와 엔코더를 이용하여 3축 변위 및 각도를 측정할 수 있는 3차원 변위센서를 개발하였으며, 기존의 LVDT를 이용한 1차원 변위측정방법과 달리 공간상의 한점을 추적하여 3차원 변위를 측정할 수 있는 새로운 개념의 센서를 개발하였다.

Fig. 2는 주증기배관의 거동을 측정하기 위한 3차원 변위측정기에 대한 개략도이다. 공간상의 한 점을 표시함에 있어 3차원 좌표계(구면좌표계, 직교좌표계,

원통좌표계 등)를 사용함은 필수적이다. 그러나 이론적인 좌표계 표현은 실질적인 계측에 있어서 각기 장단점을 가지고 있다. 일반적으로 직교좌표계를 이용한 방법을 빈번하게 접하게 되지만 측정을 위해서는 센서의 특성과 관련하여 좌표계를 바라보는 시각자체를 바꿔야 기구 설계시 용이하다.

두각과 거리를 측정하게 되면 공간상의 한점은 직교좌표를 가지게 된다. 따라서 고정된 한 점으로부터 동점까지의 거리를 실시간으로 모니터링하기 위해서는 두개의 Encoder와 LVDT를 조합하게 되면 가능하다. 즉, 동점은 유니버설조인트를 이용하여 Moment Free를 유지하도록 하고, 고정점에서는 두개의 Encoder로부터 θ, ϕ 를 측정하며, LVDT에서는 거리, r 을 측정한다.

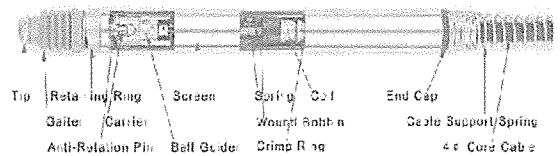


Fig. 1. Displacement LVDT Sensor

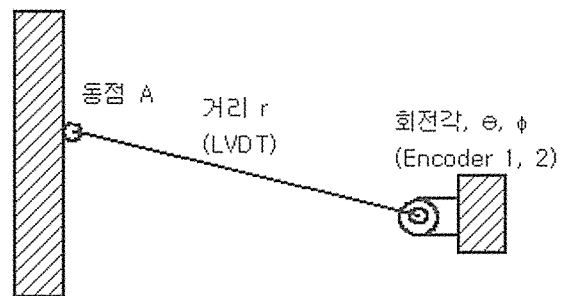


Fig. 2 Scheme Diagram of Measurement System

2-2 배관변위 감시시스템 Mock-up 제작

3차원 변위측정 센서를 설계하고 센서의 성능시험을 위해 먼저 Mock-up 형태로 제작하였는데 구성은

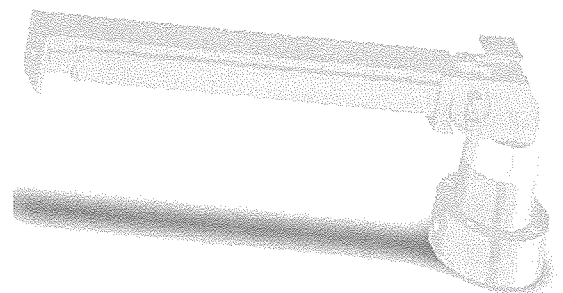


Fig. 3 3차원 배관변위 측정센서 입체도

Table 1 주증기배관 변위 센서 측정오차 평가

	참 값(mm)			측정값(mm)					
	x	y	z	x	%	y	%	z	%
위치1	300	300	300	300.12	+0.04	300.40	+0.13	300.39	+0.13
위치2	400	400	400	400.09	+0.02	400.22	+0.05	400.23	+0.05
위치3	250	350	300	249.87	-0.05	350.16	+0.04	300.28	+0.09
위치4	200	300	400	199.82	-0.09	300.44	+0.15	400.15	+0.03

Fig. 3과 같다. 배관 열팽창에 의한 직선변위 측정은 먼저, 배관변위의 모멘트가 Free가 될 수 있는 유니버설 조인트를 설치한다. 직접 배관측정부위에 LVDT rod를 연결할 경우 1차원 직선변위만 측정되므로 3차원 공간상의 변위를 측정하기 위해서는 유니버설 조인트로 연결한다. 배관측정부위와 연결된 유니버설 조인트는 배관 열팽창에 의해 3차원 공간상의 한점으로 이동되고 이때, 공간상의 한점은 구면좌표계에 의해 x, y, z 3차원의 변위로 계산되게 된다.

2-3. Mock-up 센서 측정오차 평가

3차원 변위측정센서의 정확성을 확인하기 위해 장비를 임시 고정하고, 유니버설 지점에서 임의로 4점의 위치 부여하고 데이터를 측정하였다. 이때 참값은 버니어 캘리퍼스를 통해 3차원 변위를 실제로 측정하는 것이다. Table 1은 측정결과를 정리한 것으로 장비의 정확성면에서 -0.09~+0.15% 측정오차로 최대 0.15% 이하의 정확성을 나타냄으로써 측정센서의 정확성을 확인할 수 있었다.

3. 데이터 측정 시스템 개발

데이터 측정시스템은 3차원 배관변위 측정센서의 LVDT와 Encoder를 통해 얻어진 데이터를 발전소 중앙제어실까지 전송하는 시스템이다. 이 시스템은 먼저, 얻어진 analogue 신호를 digital 신호로 전환하여 local server까지 data의 손실없이 원거리까지 전달되도록 구성하여야 하며, 중앙제어실에서는 들어온 데이터를 사용자가 편리하게 추적 관리할 수 있어야 하므로 추적 프로그램을 개발하였다.

3-1. 데이터 전송방식

3차원 배관변위 측정센서로부터 얻어진 신호는 analogue신호로서 2개의 Encoder에서 Digital Output 20 bit와 LVDT에서 Analog Output 1CH(0~10V)이 출력되며, 이 analogue신호를 중앙제어실의 local server까지 전송하여야 한다. 전송방법은 다양한 방법이 사용될 수 있다. TCP/IP 방식, RS232 & RS 485 방식, 고주파영역대 라디오 전송방법 등이 있지만 라디오 전송방법인 경우, 장기간 사용시 열악한 가동환경과 내구성, 신뢰성측면에서 적용하기에는 어렵다. 따라서, TIP/IP 방식과 RS232&RS485 방식 중 어느 방식을 선택해도 케이블을 통한 방식이므로 크게 차이는 없지만 원거리 data 전송을 위해서는 광케이블을 통하는 것이 권장할 만하다. data의 소멸 및 노이즈를 방지하기 위해서는 측정기에 AD converter와 terminal을 통해 연결 및 증폭하여 전송해야 한다. 따라서, 변위 측정장치 간 또는 변위 측정 장치와 콘트롤 PC간의 데이터 전송은 RS-485 시리얼 통신 방식으로 DC ±24V를 사용하였다.

3-2. 3차원 배관변위 추적 프로그램

발전소 운전중 주증기배관의 거동을 측정, 데이터 저장을 위해 전용프로그램을 Fig. 4와 같이 개발하였다. Program tool은 NI사에서 개발된 LabVIEW를 이용하였으며, 초기설정과 가동중 측정으로 구분하였다. 초기설정 part에서는 현장설치시, 장비의 초기설치값을 자동으로 인식하도록 하여 측정시작버튼을 누름과 동시에 측정이 시작되도록 구성하였다. 또한 가동중 측정 part는 초기설정을 바탕으로하여 주증기배관의 배관을 실시간으로 monitoring하여 설정된 일정변위가 발생하게 되면 현재 위치와 변위량을 저장하도록 개발하였다.

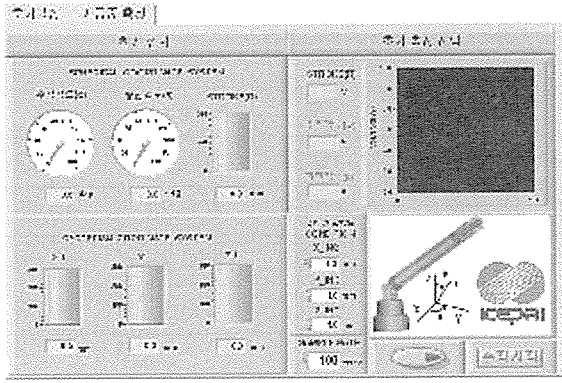


Fig. 4 3차원 배관변위 추적 프로그램



Fig. 5 보령#2 주증기관(MS-2)

4. 배관변위측정 및 원격감시 시스템

본 연구에서 개발된 3차원 배관변위 측정센서와 데이터측정시스템의 향후 안정적 운영을 위해 먼저 Mock-up 형태의 3차원 변위측정 센서와 배관변위 추적 프로그램을 제작하였다. 성능시험을 위해 각 발전회사 대상호기 중 Mock-up 제작 일정과 계획예방정비기간이 일치된 국내 P화력 2호기 주증기관(Main steam line) 보일러 헤더 출구측(MS-2 Hanger 위치)에 설치하였다. 측정은 주증기관의 행거(Hanger)중 보일러 상부의 MS-2 행거의 Lug부에 설치되어 약 3개월간 운전되었다.

4-1. 측정시스템 Mock-up 설치 및 적용

4-1-1. 설치위치 선정

3차원 배관변위 측정센서의 설치위치는 배관을 자중(Deadweight) 및 운전시 열팽창 하중을 지지하는 각 행거(Hanger)중 보일러측 MS-2행거(Fig. 5)에 설치하였다. 측정센서를 배관 표면에 연결할 경우, 장기 운전시 배관과의 용접부의 손상으로 배관 모재에 미치는 영향이 클 수 있으므로 Fig. 6과 같은 Clamp부에 설치되었다. 행거 Clamp부는 한 지점에 행거를 연결하기 위해 배관 직경과 동일한 직경의 2개의 Clamp를 볼트로 연결하는 구조로 되어있으며, 행거는 상부 볼트에 고리형태의 행거 Rod에 연결되어 있다. 이때 하부 Clamp 볼트는 각 행거의 중량에 따라 보온재 부위를 제외하고 약 200mm이상 돌출되어 있으므로 이 부위에 측정센서를 체결하였다.



Fig. 6 MS-2 행거하부 Clamp

4-1-2. 측정센서의 설치

1) 측정센서 고정구조물

3차원 배관변위 측정센서를 장기간동안 고정하고, 지지할 수 있도록 내구성과 신뢰성을 갖춘 고정구조물이 필요하다. 따라서 3차원 변위측정센서의 Fixture가 고정될 고정구조물을 설계하였다. 고정구조물은 설치의 편의성을 위해 구조물의 변경이 쉬워야 하고, 외부 진동에도 강해야 하며, 온도차이에 따라 변형이 적어야 한다. 뿐만 아니라, 3축 변위측정 장비의 무게에 의해서도 처짐이나 굽힘현상을 배제하기 위해 Truss 구조를 갖추어야 한다. 재질은 무게와 부식성을 감안하여 알루미늄 합금을 사용하였다. 구조물의 설치는 Fig. 7과 같이 3차원 변위측정 센서가 설치될 주증기관 MS-2 행거 Clamp부로부터 근접된 인접 구조물에 설치하였다.

2) 3차원 변위측정센서의 설치

고정구조물의 설치한 뒤, 3차원 배관변위 측정센서의 고정부인 Fixture부를 고정구조물에 설치하고 측정지점인 행거 Clamp부로부터 원형파이프(OD100×10t)를 용접하고 3차원 변위측정센서의 끝단 유니버설조

인트에 파이프를 연결하여 Fig. 8과 같이 모든 변위측정센서 설치를 완료하였다.



Fig. 7 고정구조물의 설치모습

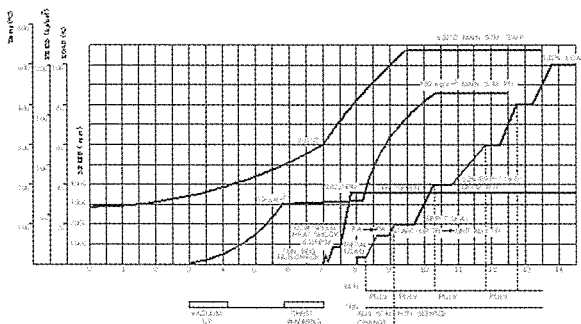


Fig. 8 설치후 측정시스템

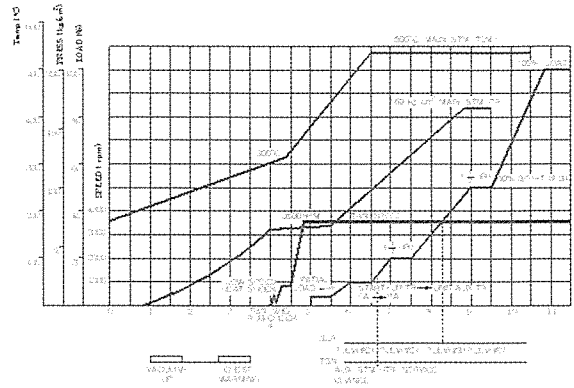
4-2. 변위측정시스템 성능시험

4-2-1. 주증기관의 표준선도

Fig. 9는 Cold 및 Warm Start시 운전모드에 따른 보령화력 2호기 출력에 따른 표준선도를 나타낸 것이다. 주증기관의 열팽창 변위는 각 기동시간에 따른 온도와 압력에 의해 발생된다.



(a) Cold Start-up schedule



(b) Warm Start-up schedule

Fig. 9 기동모드에 따른 표준선도

4-2-2. 측정지점의 3축 설계변위 및 해석변위

3차원 배관변위 측정시스템의 기동전, 측정지점의 설계변위를 배관전용 해석 프로그램인 Pipeplus를 이용하여 해석하였다. 해석은 주증기 배관의 Cold Start-up시 기동시간에 따른 각 주증기 온도와 압력을 통해 배관 열팽창 변위를 해석하였다(Fig. 10).

4-2-3. Mock-up 성능시험

Fig. 11은 데이터측정시스템으로부터 보일러 점화 후 113일간 측정된 MS-2행거 부위의 3축 변위 측정 데이터를 나타낸다. 각각 x, y, z방향의 변위이며, dist는 각 3축방향의 벡터 합을 나타낸다. 정상운전중 x축방향은 15~20mm, y축방향은 -28~35mm, z축방향은 18~25mm의 분포를 나타내었다. 각 방향의 벡터 합(Dist)은 38~43mm의 분포를 나타내었다. x, z방향은 y방향보다 운전시 유체의 맥동 등 운전중 유체특성에 의해 다소 헌팅(hunting)되는 경향을 나타내고 있다. 해석변위와는 약 5mm이내의 오차로서 실제 변위와 변위가 발생하는 방향 및 크기가 유사하게 발생되고 있음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 12에서 알 수 있듯이 이 발전소는 기동후 총 5회의 경부하 정지가 있었으며, 온도센서를 이용하여 배관내 증기온도를 측정된 결과와 배관변위장치를 통해 측정된 변위분포가 증기온도 감소시 배관 변위가 감소되므로 총 5회의 기동·정지 시점에서 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있었다.

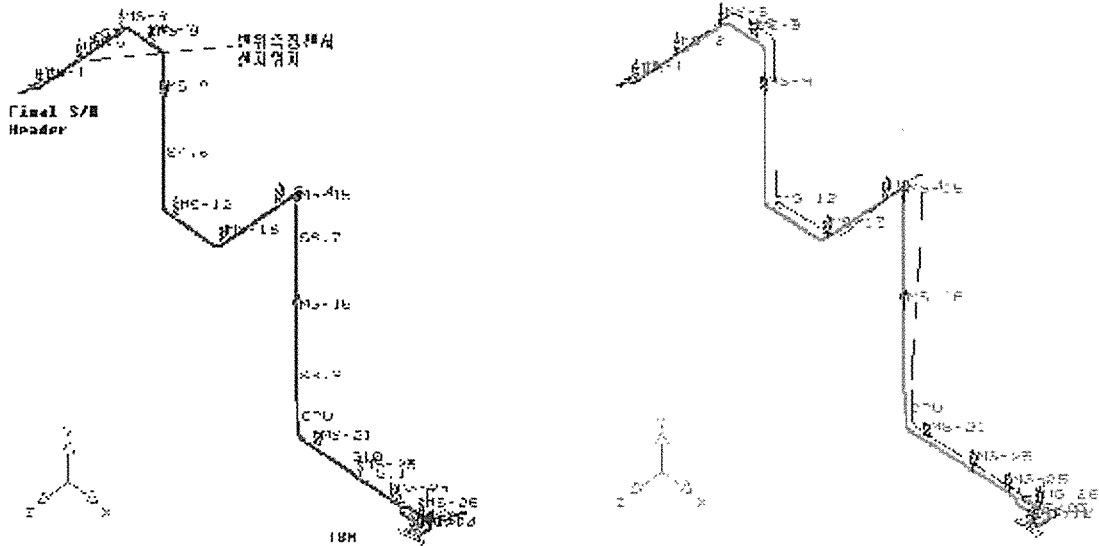


Fig. 10 주중기관의 모델링 및 변위해석(적색라인 변위값)

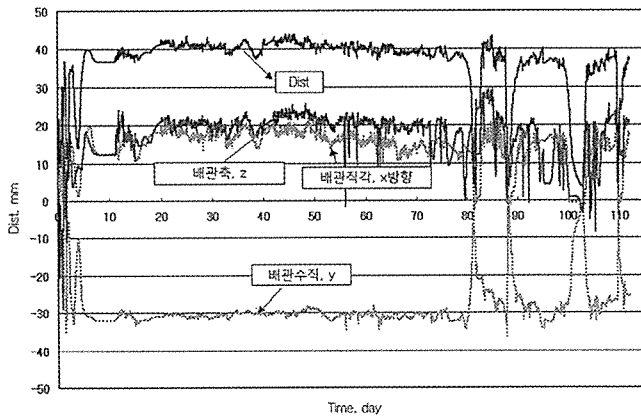


Fig. 11 MS-2 행거부의 3축변위 측정

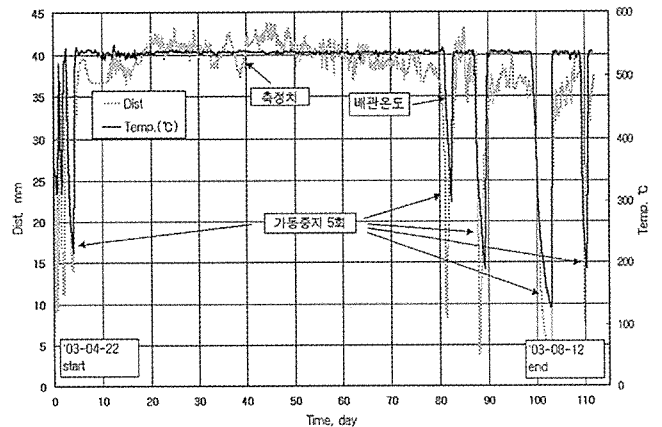


Fig. 12 온도에 따른 3축 총변위(벡터 합)와 측정온도와의 관계

4-3. 실시간 배관변위 원격감시시스템

4-3-1. 개요

측정된 데이터를 실시간 원격감시(Remote monitoring)하기 위해서는 우선적으로 신뢰성있는 solution을 통해 system을 구성해야한다. 본 네트워크 시스템은 추후에 수행될 예정이다. 본 시스템은 각 설치된 장소로부터 측정된 변위를 data acquisition system을 통해 local server까지 연결한다. 이때 data acquisition system은 RS485 통신체계와 terminal (connection & signal amplifier), AD board로 구성된다. 각 발전회사별 local server에서 수집된 data는 각 발전회사 중앙제어실은 물론 전력연구원과 발전회사간 네

트워크를 이용하여 전력연구원 원격감시 시스템 서버(server)에서 확인하여 3차원 변위측정 장치가 설치된 배관의 이상변위 발생시 경고기능을 통해 추적, 관리하며 조기 예방정비를 수행함으로써 설비의 안정적인 운전에 기여할 수 있다. 이러한 네트워크 시스템까지 연결시켜주기 위해서는 별도의 프로그램을 개발하여야 하며, 세부 프로그램 개발 및 원격감시는 추후에 수행할 예정이다.

4-3-2. Network system

3차원 배관변위 측정센서로부터 local server까지 전송된 data는 3차원 배관변위 추적프로그램을 통해 처리되며, 다른 지역에서 이 자료를 필요로 할 경우, 기

존의 인터넷이나 네트워크를 통해 확인 가능하다. 통합관리실에서 기타 다른 지역의 발전소에 설치된 3차원 변위측정 센서에서 측정된 변위를 실시간으로 확인, 추적할 수 있으며, 각 위치에서의 설계변위 초과시 경보기능을 포함한 모든 기능을 확인할 수 있게 된다는 것이다. local server에서는 지정된 시간마다 data를 저장, 전송하며, 기타 지역에서도 별도 프로그램을 통해 data를 저장할 수 있으며, 이렇게 저장된 data는 사용자가 필요한 형식으로 변환하여 사용할 수 있다.

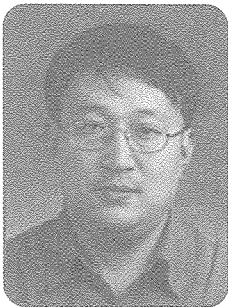
5. 결론

고온고압 설비에서의 주요 배관은 매우 가혹한 운전조건에서 운전되는 것은 물론 빈번한 기동정지로

인하여 외국에서도 파열사고 등 사고의 빈도가 높아지고 있으며 지지장치 계통의 이상 작동에 의하여 변위가 설계치를 초과하여 운전되는 등 배관의 변위를 3차원으로 측정하여 분석하는 시스템이 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서 고온고압의 주요배관에 배관 변위 감시장치를 3차원으로 측정할 수 있는 시스템을 개발하여 시범운전하고 취득된 데이터를 분석하는 기술을 개발하였다. 배관변위 감시를 위하여는 LVDT와 Encoder를 이용한 3차원 센서를 개발하였으며 이를 운전 중인 발전소에 적용하여 성능시험을 완료하였다. 향후 본 시스템을 발전소에 활용하여 전국적인 네트워크를 구성하므로 화력발전소의 주요 배관의 안전한 운전에 기여할 것으로 기대된다.

국내 자가용 발전설비 현황 및 2004년도 사용전 및 정기 검사계획



한국전기안전공사
전력설비검사처
부장 박창규
Tel : (02)440-2322

총223대가 가동되고 있으며 총용량은 5,970 MW이며, 최근 인허가 현황을 보면 집단에너지 설비와 소각로가 증가하고 있는 추세이다.

업종별 구성비를 보면 제조업이 전체의 67.1%이며 1차철강 41.1%, 집단에너지 32.5%, 화학 9.4%, 석유정제 6.5%, 섬유 3.6%, 제지 1.9%, 비철금속1.4%, 목재 0.3%, 소각설비 0.7%, 기타 1.3% 순으로 되어 있다.

1. 설비의 현황

1. 생산 업종별 설비 분포

2003년 12월 말 현재 상시 가동하고 있는 업체는 제조업 부분에 51개 업체, 집단에너지 17개 업체, 소각설비 20개 업체 및 기타부문 9개 업체가 가동하고 있다.

자가용발전설비의 총설비 현황을 보면 97개 업체,

2. 지역별 설비분포

2003년말 기준으로 발전설비의 지역별 업체수 분포 순위는 울산, 경기, 전남 순이지만 발전 시설용량으로 조사해 보면 전남, 경북이 전체설비의 약50%를 차지하고 있어 대단위 용량의 설치가 집중되는 현상을 알 수 있다. 이는 철강산업의 주체인 (주)포스코와 여수 화학단지가 위치한 지역임을 알 수 있다.